

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

GEORGES XAVIER DUHAUT

INGÉNIEUR DIPLOMÉ DE L'ÉCOLE SUPÉRIEURE
D'ÉLECTRICITÉ

ANCIEN INGÉNIEUR A L'UNION D'ÉLECTRICITÉ

INGÉNIEUR A L'ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

CHARGÉ DU SERVICE "ÉTUDES ET TRAVAUX"
DU CENTRE RÉGIONAL DE TRANSPORT D'ÉNERGIE
DE PARIS

1^{re} THÈSE : Contribution à l'Étude des pertes
électriques dans les lignes à hautes tensions
continues par effet des gouttes d'eau pendantes

2^e THÈSE : Propositions données par la Faculté

Soutenues le 3 Janvier 1947 avec la mention très Honorable

MM. Pauthenier Président

Kastler

Lucas

} Examineurs

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

GEORGES XAVIER DUHAUT

INGÉNIEUR DIPLOMÉ DE L'ÉCOLE SUPÉRIEURE
D'ÉLECTRICITÉ

ANCIEN INGÉNIEUR A L'UNION D'ÉLECTRICITÉ

INGÉNIEUR A L'ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

CHARGÉ DU SERVICE "ÉTUDES ET TRAVAUX"
DU CENTRE RÉGIONAL DE TRANSPORT D'ÉNERGIE
DE PARIS

1^{re} THÈSE : Contribution à l'Étude des pertes
électriques dans les lignes à hautes tensions
continues par effet des gouttes d'eau pendantes

2^e THÈSE : Propositions données par la Faculté

Soutenues le 3 Janvier 1947 avec la mention très Honorable

MM. Pauthenier Président

Kastler	}	Examineurs
Lucas		



FACULTE DES SCIENCES DE L'UNIVERSITE DE PARIS

Doyen J. CABANNES

PROFESSEURS

L. Blaringhem	T Botanique	Lanquine	T Géologie structurale et géologie appliquée
G. Julia	T Analyse supérieure et Algèbre supérieure	Valiron	T Calcul différentiel et Calcul intégral
C. Mauguin	T Minéralogie	Barrabé	Géologie structurale et géologie appliquée
A. Michel-Lévy	T Petrographie	Vavon	T Analyse et mesures chimiques
A. Denjoy	T Géométrie supérieure	G. Darmon	T Mathématiques générales
L. Luitaud	T Géographie physique et géologie dynamique	Chatton	T Biologie maritime
E. Darmon	T Enseignement de Physique	Aubel	Chimie biologique
Robert Lévy	T Physiologie comparée	Jacques Bourcart ...	Géographie physique et Géologie dynamique
Henri Villat	T Mécanique des fluides et applications	M ^{me} Joliot Curie ..	Physique générale et Radioactivité
Ch. Jacob	T Géologie	Plantefol	T Botanique
P. Pascal	T Chimie générale	Cabannes	T Recherches physiques
M. Fréchet	T Calcul des probabilités et Physique mathématique	Grassé	T Zoologie (Evolution des êtres organisés)
E. Esclapart	T Astronomie	Prévost	Chimie organique
M ^{me} Ramart-Lucas	T Chimie organique	Bouligand	Mathématiques
H. Béghin	T Mécanique physique et expérimentale	Chaudron	Chimie
Foch	T Mécanique expérimentale des fluides	Wyart	Minéralogie
Pauthenier	T Electrotechnique générale	Teissier	T Zoologie
De Broglie	T Théories physiques	Mangenot	T Biologie végétale
Chrétien	Optique appliquée	P. Auger	T Physique quantique et relativité
Job	Chimie générale	Momier	Physiologie générale
Prenant	T Anatomie et Histologie comparées	Piveteau	Géologie
Villey	T Mécanique appliquée	Rocard	T Physique
Combes	T Physiologie végétale	H. Cartan	Calcul différentiel
Garnier	T Application de l'analyse à la Géométrie	Schaeffer	T Physiologie des fonctions
Pérès	T Mécanique rationnelle	Laffitte	Chimie (P.C.B.)
Hackspill	T Chimie minérale	Leray	Mécanique théorique des fluides
Langier	T Physiologie générale	Favart	Calcul des probabilités et Physique-Mathématique
Toussaint	Technique Aéronautique	Coulomb	T Physique du globe
M. Curie	Physique (P.C.B.)	M ^{lle} Cousin	Biologie animale (P.C.B.)
G. Ribaud	T Hautes températures	Chrétien	Analyse et mesures chimiques
Chazy	T Mécanique analytique	Drach	Evolution des êtres organisés.
Croze	T Physique théorique et physique céleste	Chatelet	T Arithmétique et théorie des nombres
Gault	T Chimie appliquée	Ephrussi	T Génétique
Dupont	T Théories chimiques	Wurmser	T Biologie physico-chimique
		Kastler	Physique
		Bauer	T Chimie-Physique
		Rivière	Géologie (P.C.B.)

Secrétaire Ch. Monier

A ma Mère

A Monsieur Georges COLBUS

A ma femme

A mes enfants

A Monsieur Henri JOUVION

Secrétaire Général de l'Ecole Supérieure d'Electricité

A Monsieur Maurice LABORDE

Directeur-Adjoint à l'Union d'électricité

Professeur à l'Ecole Supérieure d'Electricité

*Hommage de respectueuse
et sincère reconnaissance*

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PERTES ELECTRIQUES
DANS LES LIGNES A HAUTES TENSIONS CONTINUES
PAR EFFET DE GOUTTES D'EAU PENDANTES

EXPOSE DU PROBLEME

Dans la technique des hautes tensions, on désigne sous le nom d'effet couronne l'ensemble des phénomènes dus à la disruptive locale de l'air sous l'action du champ électrique au voisinage d'un conducteur.

Nous savons qu'un faible dépassement au-dessus du gradient de potentiel critique, de 31 kV/cm, provoque autour d'un conducteur une ionisation par choc de l'air environnant, qui se révèle par un crépitement audible et une luminosité visible.

L'effet couronne s'accompagne d'une perte d'énergie non négligeable, augmentant très rapidement à mesure que l'on élève la tension appliquée, et donne lieu, outre les phénomènes acoustiques et optiques déjà mentionnés, à des effets thermiques et chimiques plus ou moins nuisibles.

Au point de vue physique, deux cas sont à envisager dans l'étude de l'effet couronne, suivant que la tension appliquée au conducteur est alternative ou continue; si le premier a fait l'objet de recherches importantes de la part d'un grand nombre de savants et d'ingénieurs, le second a été rarement étudié et, à part les travaux de Monsieur le Professeur PAUTHENIER, [1] nous n'avons trouvé aucune étude récente sur l'effet couronne en courant continu.

Principalement en Amérique, de nombreuses recherches

ont été effectuées en vue d'étudier les caractéristiques intensité-tension de la "décharge couronne" qui se produit dans l'air à la pression atmosphérique. Malheureusement, les auteurs de la plupart de ces travaux se sont bornés à trouver des équations empiriques permettant de représenter les courbes de l'intensité en fonction de la tension et de déterminer pour quels potentiels la décharge par étincelles apparaît. Bien que ces recherches présentent quelque intérêt au point de vue de la technique industrielle, elles ne jettent que très peu de lumière sur les phénomènes fondamentaux.

Par ailleurs, il semble que les expérimentateurs se soient attachés principalement à l'effet couronne en courant alternatif poussés par les besoins industriels de leur époque. Mais aujourd'hui, le problème de la transmission de puissances très importantes à des distances bien plus grandes que celles que l'on pratique actuellement semble réalisable dans un avenir prochain soit par une extrapolation du système de transmission actuel par courant alternatif, soit par un système de transport par courant continu.

En présence des éléments de réalisation déjà acquis, la transmission par courant continu peut être considérée dès maintenant comme viable, et en dehors du stade des imaginations des chercheurs; le problème de l'effet couronne en courant continu va donc prendre une importance plus grande et nécessiter des recherches approfondies.

L'étude des phénomènes en courant continu permettra sans doute de dégager et d'étudier clairement des effets nouveaux qu'il est absolument impossible d'interpréter lorsque la tension appliquée est alternative.

La variable temps, en effet, par suite du retour des charges d'espace formées pendant la demi-période précédente, a toujours compliqué les recherches et son élimi-

nation par des observations en courant continu simplifiera grandement le problème. Les différentes manifestations du phénomène vu sous un angle nouveau permettront alors d'envisager le problème en courant alternatif avec plus de netteté.

Les recherches exposées ci-après ont eu pour origine la question suivante :

"Influence des gouttes d'eau pendantes sous un conducteur soumis à une haute tension continue et négative".

On se propose, dans ce qui va suivre, de déterminer, à partir de l'expérimentation en courant continu, la nature physique de certains phénomènes qui apparaissent dans la décharge dans l'air, à la pression atmosphérique, par l'effet couronne et d'en tirer des renseignements sur l'espace chargé avoisinant.

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de BELLEVUE du Centre National de la Recherche Scientifique.

Nous sommes heureux de pouvoir exprimer notre très sincère reconnaissance à Monsieur le Professeur PAUTHENIER, qui nous a poussé à entreprendre l'étude de ce problème, nous a guidé au cours de nos recherches et, en particulier, pour l'aide qu'il nous a apportée dans l'interprétation des résultats obtenus.

Nous tenons, en outre, à remercier très sincèrement Monsieur DUBOIS, Sous-Directeur du Laboratoire des Hautes Tensions, qui nous a donné de précieux conseils et a beaucoup facilité la réalisation des montages.

Nos remerciements vont également à Monsieur DEMON, Ingénieur-Docteur chargé de recherches au même Laboratoire, qui nous a aimablement fourni d'utiles renseignements et

pour son inlassable concours à l'exécution des mesures.

Enfin, nous n'oublions pas que l'UNION D'ELECTRICITE a rendu possible la poursuite de ces travaux en nous octroyant généreusement le temps nécessaire. Nous tenons à exprimer notre gratitude particulière à son Directeur-adjoint, Monsieur LABORDE, Professeur à l'Ecole Supérieure d'Electricité, pour l'intérêt qu'il nous a sans cesse témoigné depuis l'époque où il nous a appelé à son service.

Monsieur GOURIO, Directeur du Centre de Documentation Messine, trouvera ici nos remerciements pour avoir mis obligeamment à notre disposition son très important fichier documentaire et pour s'être chargé des recherches bibliographiques de notre travail.

Les deux phénomènes fondamentaux découverts au cours de nos travaux ont été observé pour la première fois:

Vibration des gouttes pendantes : 15 Mai 1944

Relaxation dans l'émission des pointes fixes : 6 juin 1944

Les nombres entre crochets [] renvoient à la bibliographie en fin de notre exposé.

PREMIERE PARTIE

GENERALITES SUR LES PERTES DE PUISSANCE

PAR EFFET COURONNE.

(BASES EXPERIMENTALES ADOPTEES)

Dans le domaine courant des applications industrielles concernant le transport de l'énergie électrique au moyen des lignes aériennes à haute tension, les exploitants ont l'habitude de se placer techniquement dans certaines conditions bien définies. Nous allons tirer de celles-ci la partie relative à l'effet couronne, car ces données doivent influencer la suite de notre étude.

L'inconvénient majeur de l'effet couronne, qui peut effectivement motiver les directives spéciales adoptées par les exploitants, est sans contredit la perte d'énergie considérée au point de vue de sa valeur économique. Pour réduire cet élément, l'accroissement du rayon du conducteur est le seul moyen efficace, l'écartement des conducteurs restant uniquement déterminé par l'isolement à la masse sur les pylônes. On augmente souvent le rayon d'un conducteur, au-delà de la valeur qu'il est économique d'adopter, si l'on ne tient pas compte des pertes par effet couronne, et il est très intéressant de se reporter aux expériences d'exploitations sur ce point [2]

A la tension de 150 kV, la ligne française la plus tendue au point de vue de l'effet couronne est la ligne VIOLAIRE-LYON, qui part de VIOLAIRE à une altitude de 1.000 mètres. Elle est équipée de six câbles en cuivre de 109 mm² de section, diamètre 13,5 mm, dont l'écartement moyen est de 4 mètres 85. Elle fonctionne au voisinage de l'effet couronne, avec un gradient maximum de 31 kV/cm, et effluve très légèrement en permanence.

A la tension de 220 kV, la seule ligne française en exploitation qui pose une question d'effet couronne est la première ligne CHAINGY-EGUZON, qui ne dépasse pas l'altitude de 250 mètres, mais avec des conducteurs de 293 mm², diamètre 22,3 mm, avec un écartement entre phases de 7 mètres 80 en triangle; le gradient de travail est de 26,2 kV/cm au maximum.

La ligne à 285 kV BOULDER-DAM-LOS ANGELES, la seule ligne en exploitation à plus de 220 kV, passe à 1.480 mètres d'altitude et est équipée de conducteurs creux en cuivre de 260 mm² de section utile, dont le diamètre extérieur est de 35,5 mm; ces conducteurs sont disposés en nappe horizontale, avec un écartement de 9 mètres 80 entre phases voisines; cette ligne travaille avec un gradient de 31 kV/cm au maximum.

La ligne allemande de la BAVIERE à la RUHR, équipée en 1927 pour pouvoir être portée éventuellement à 380 kV, fonctionne à 220 kV; elle est équipée avec six câbles creux en cuivre de 400 mm² de section utile et de 42 mm de diamètre extérieur.

Ces quelques exemples peuvent être considérés comme représentant les cas limites d'exploitation de lignes au voisinage de l'effet couronne; ils permettent de tirer la conclusion suivante :

Les conducteurs utilisés pour la construction des lignes aériennes de transport d'énergie électrique à haute tension sont ordinairement calculés de manière à assurer, en service normal, sans intempéries, une exploitation correcte sans aucune perte par effet couronne.

Dans notre travail, nous nous sommes placé au point de vue pratique, en examinant ce qui se passe avant le seuil de l'effet couronne. Par ailleurs, la tension d'apparition

des pertes par effet couronne négatif étant un peu plus faible que celle qui correspond à la tension positive, nous avons procédé aux essais uniquement en tension négative.

Mais les résultats obtenus ont une portée générale.

DEUXIÈME PARTIE

INFLUENCE DES GOUTTES D'EAU

PENDANTES

Nous avons trouvé que l'influence des gouttes d'eau pendantes affecte beaucoup le phénomène de l'effet couronne. On s'est efforcé, pour ne pas tirer de fausses conclusions d'expériences faites au laboratoire, de procéder à des dégraissages et des nettoyages soignés des conducteurs étudiés, afin que les poussières, qui facilitent beaucoup les effluves et rendent délicates les expériences sur l'effet couronne, soient éliminées. Ces précautions mettent artificiellement les conducteurs dans un état équivalent à celui où ils se trouvent en exploitation après quelques mois de service. Les intempéries et peut-être aussi les effluves mêmes qui s'y produisent éliminant, en effet, les poussières après un certain temps d'exploitation.

Si les aspérités dues aux poussières s'éliminant à la longue sur les conducteurs en service, des irrégularités fugaces, semblables à des pointes, peuvent apparaître et avoir une influence sur les pertes par effet couronne.

C'est le cas, notamment, de la présence éventuelle des gouttes d'eau pendantes pouvant provenir des intempéries telles que la pluie, le brouillard et la rosée.

Il nous a paru intéressant d'en étudier le comportement et, comme nous allons le voir, cette étude nous a permis de mettre en évidence un certain nombre de phénomènes nouveaux des plus curieux.

CHAPITRE I

MONTAGES ET OBSERVATIONS PRELIMINAIRES

Les expériences ont été exécutées dans l'air à la pression atmosphérique avec une goutte d'eau pendante située à la périphérie d'un conducteur cylindrique représentant la ligne électrique à haute tension continue étudiée.

La figure I ci-dessous représente le montage utilisé pour les essais préliminaires, essais ayant pour but essentiel de dégrossir le phénomène.

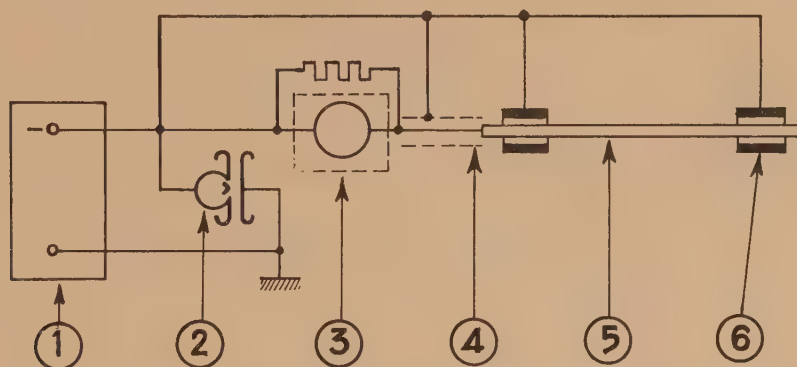


FIGURE I - Schéma de l'installation adoptée pour l'exécution des essais préliminaires : 1, poste haute tension continue; 2, électromètre; 3, galvanomètre sensible avec résistance de shuntage; 4, blindage; 5, conducteur à étudier; 6, anneau de garde.

Un galvanomètre très sensible est alors inséré directement dans le circuit à haute tension et l'utilisation d'anneaux de garde convenablement placés nous permet de procéder à l'exécution des essais sans être gêné par les courants de fuite, puisque ceux-ci se trouvent être drainés avant l'appareil de mesure.

Le conducteur étant porté à un potentiel négatif, insuffisant pour provoquer une émission de pertes électriques du conducteur en temps normal, si on dépose une goutte d'eau sur ce conducteur, immédiatement celle-ci se met en pointe fixe et un courant de perte prend naissance.

Ainsi, l'apparition d'une goutte d'eau à la périphérie d'un conducteur qui n'émettait aucun courant de perte par effet couronne, provoque instantanément une émission de charges. A ce moment, si l'on diminue progressivement la tension appliquée au conducteur, on remarque que, pour une certaine tension, la goutte d'eau pendante prend un mouvement d'oscillation auto-entretenu [3]. On se trouve devant un ensemble de phénomènes nouveaux qui demandent à être étudiés en détail, ce qui nécessite une amélioration importante du montage préliminaire précédent.

CHAPITRE II

ETUDE DE L'EMISSION DE COURANT DES GOUTTES D'EAU PENDANTES.

I - MONTAGE ET TECHNIQUE UTILISES -

Le montage précédent nous a permis de choisir un montage mieux adapté aux recherches et dont la réalisation a été guidée par les considérations suivantes :

- 1) Etudier les phénomènes sur une ligne unipolaire, puisque nous ne pouvions avoir à notre disposition qu'une tension élevée par rapport à la terre;
- 2) Exécuter les recherches dans un champ électrique aussi bien défini que possible;
- 3) Disposer les appareils de mesure et de contrôle du côté terre, afin d'écartier tous dangers en ce qui

concerne les appareils et les expérimentateurs.

L'installation que nous avons adoptée est représentée par le Schéma 2 suivant; il utilise comme appareils principaux :

- Une source de potentiel continu à haute tension négative,
- une chambre expérimentale et des dispositifs de mesure.

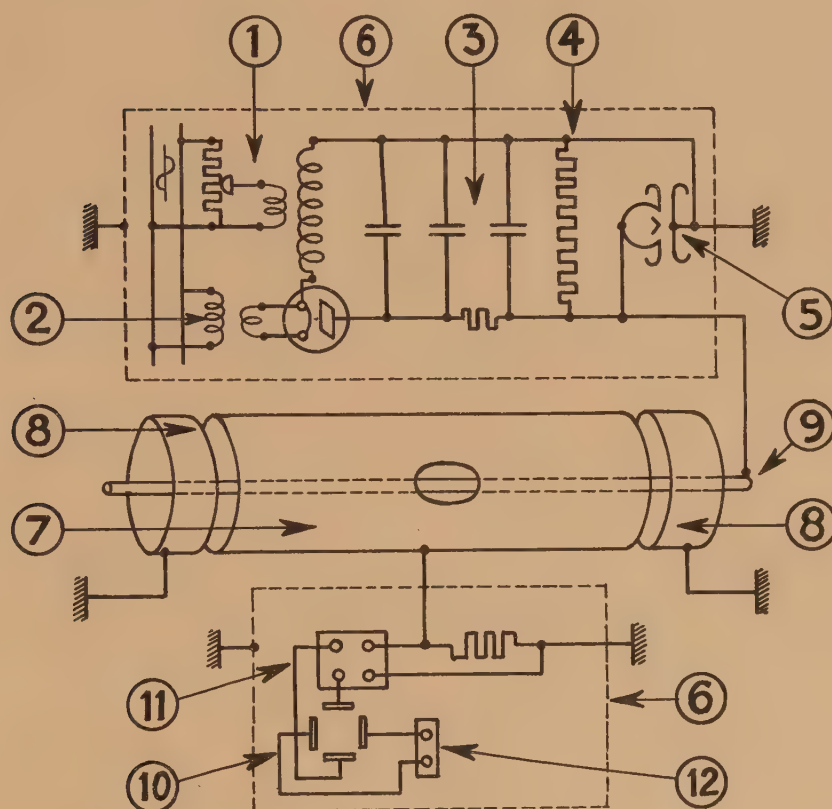


FIGURE 2 - Schéma général de l'installation expérimentale :

1, transformateur élévateur et potentiomètre de réglage; 2, kénotron et transformateur de chauffage; 3, filtre; 4, résistance de débit permanent; 5, électromètre; 6, blindages; 7, électrode de capture; 8, électrode de garde; 9, conducteur à étudier; 10, oscillographe à rayon cathodique; 11, amplificateur; 12, balayage linéaire

A) SOURCE À HAUTE TENSION

La source électrique de courant continu à tension élevée est réalisée au moyen d'un kénotron classique redressant une seule alternance et débitant à travers un système de filtrage approprié destiné à atténuer les ondulations de la tension redressée : un relevé oscillographique de la tension d'utilisation a montré que les variations subsistantes sont négligeables vis-à-vis des tensions employées au cours de nos essais.

La tension d'utilisation est néanmoins stabilisée par l'adjonction en dérivation, sur la liaison HT avec la ligne à étudier, d'une résistance donnant naissance à un débit permanent important vis-à-vis des courants de pertes par effet couronne, tout en apportant à la tension redressée une ondulation insignifiante.

La tension peut être réglée sans danger à l'aide d'un montage potentiométrique disposé aux bornes primaires du transformateur élévateur à haute tension.

La différence de potentiel appliquée au conducteur est mesurée à l'aide d'un électromètre ABRAHAM et VILLARD préalablement étalonné.

La différence de potentiel disponible pour nos essais peut atteindre avec cet ensemble, fortement isolé, une valeur maximum de 65 kV par rapport à la terre.

B) CHAMBRE EXPERIMENTALE

Cette partie du montage est constituée par un condensateur cylindrique de grandes dimensions à électrodes coaxiales. Il comporte :

- 1) Une électrode centrale représentant la ligne à étudier, celle-ci étant constituée par une série de conducteurs de diamètres variables pouvant se substituer les uns aux autres suivant les besoins. La gamme d'électrodes utilisés a des diamè-

tres variant entre 5mm et 4mm, ce dernier chiffre représentant industriellement un diamètre maximum pour les réalisations courantes.

2) Une électrode périphérique de 480 mm de diamètre, composée d'une partie centrale de 615 mm de longueur, destinée à capter le courant de perte dû à l'effet couronne, et de deux cylindres de garde, de même diamètre que le précédent d'une longueur de 180 mm, situés à chaque extrémité du cylindre central; l'intervalle entre les portions terminales et centrales est de 12,5 mm.

Par ailleurs, les deux cylindres de garde sont mis en communication électrique avec le circuit de terre du laboratoire. Cette disposition a pour but de régulariser la répartition du potentiel entre les électrodes et de pouvoir définir parfaitement, si besoin est, la longueur exacte de la portion de conducteur soumis aux essais.

C) DISPOSITIFS DE MESURE ET D'INVESTIGATION

Le courant de perte dû à l'effet couronne, capté par l'électrode périphérique centrale de la chambre expérimentale, peut être dirigé vers :

- a)- un préamplificateur; le courant à la sortie de celui-ci est lui-même envoyé, à travers un condensateur, dans un second amplificateur à deux étages, travaillant en cascade et débitant sur les plaques verticales d'un oscillographe Dumont à rayon cathodique ;
- b)- un galvanomètre shunté, qui permet de mesurer les courants avec précision (10^{-9} ampère par millimètre de déviation du spot)

L'oscillographe est muni d'un dispositif permettant de photographier les phénomènes observés : Pour photographier sur l'écran luminescent, la trace du faisceau cathodique, on utilise un appareil à grande ouverture et des plaques perchromatiques ultra-rapides. Ces clichés sont ensuite agrandis

de manière que les oscillogrammes présentent les mêmes dimensions que les courbes tracées sur l'écran de l'oscillographe. Les agrandissements permettent alors d'effectuer les mesures.

Pour déterminer la base de temps des oscillogrammes, on a soin de relever des oscillogrammes correspondant aux variations du courant de sortie d'un oscillateur à basse fréquence étaloné; on prend alors la précaution de régler le balayage de façon identique à celui qui est employé pour la prise de vue des oscillogrammes des courants de perte dus à l'effet couronne.

II - MISE AU POINT DU MATERIEL EXPERIMENTAL

Au cours de nos essais, nous avons rencontré beaucoup de difficultés pour éliminer les actions parasites qui agissent sur l'antenne constituée par le cylindre de la chambre expérimentale et les câbles d'entrée et de sortie.

Un blindage important nous a pourtant permis d'obtenir des relevés oscillographiques satisfaisants.

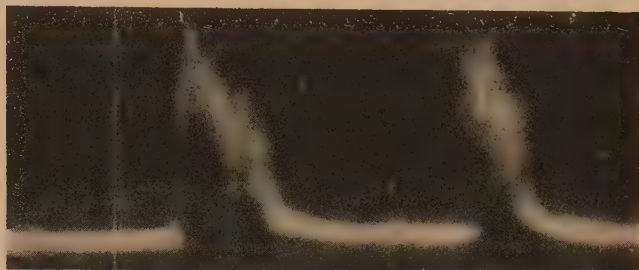
Les fuites de courant à la surface des supports diélectriques ont été éliminées après de longues recherches, en utilisant des isolateurs parfaitement adaptés au problème et soigneusement paraffinés.

III - RESULTATS EXPERIMENTAUX

Il nous a semblé alors intéressant d'examiner attentivement la forme du courant de perte, dû à l'émission intermittente de la pointe d'eau vibrante à l'aide de l'oscillographe cathodique intercalé entre l'électrode de capture

de la chambre expérimentale et la terre.

Nous donnons ci-dessous deux oscillogrammes typiques ainsi obtenu :



On remarque sur ces relevés photographiques que la période des débuts d'émission est strictement identique à la période de vibration de la goutte vibrante; celle-ci est mesurée par une méthode de stroboscopie directe utilisant un stroboscope à cylindre fendu entraîné par un mouvement d'horlogerie.

Ainsi, la goutte émet à son passage fugace par la forme pointue, et on observe que cette émission de courant se déclenche brusquement pour aller en décroissant à mesure que la pointe disparaît.

La partie décroissante des oscillogrammes met en évidence une succession de dentelures, qu'il importe maintenant d'étudier.

Puisque le phénomène de dentelure apparaît uniquement lorsque la goutte d'eau vibrante passe par sa position pointue, il semble logique d'étudier ce qui se passe dans le cas d'une pointe fixe.

Pour cela, nous avons fixé sur le conducteur de 5mm de diamètre une pointe métallique fixe, constituée simplement par une aiguille de phonographe.

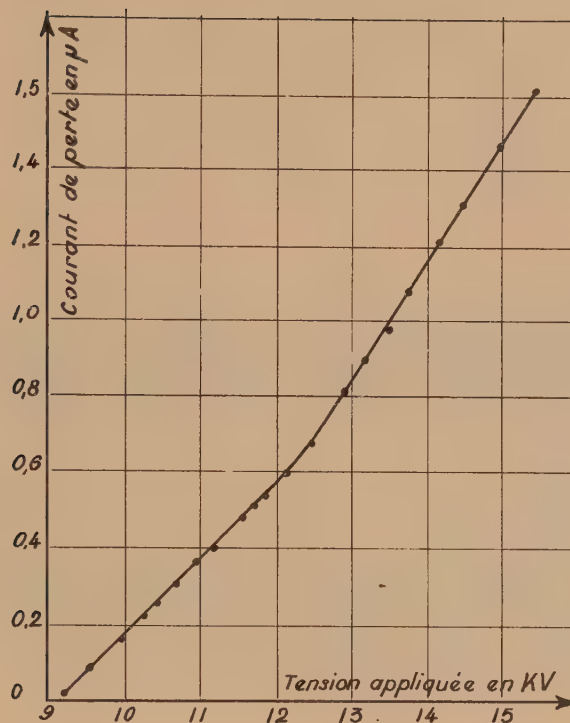
L'apparition de la première décharge se produit pour une tension voisine de 9 kV. Si l'on compare ce chiffre avec les 34,2 kV nécessaires pour provoquer l'effet couronne dans le cas du conducteur lisse, on remarque que la présence de cette pointe abaisse de près de 75 pour cent la valeur de la tension nécessaire pour provoquer la première effluve. On remarque au cours de l'essai que l'intensité, mesurée au galvanomètre, augmente brusquement au début de l'effet couronne et présente ainsi l'allure d'une véritable impulsion. Après cet amorçage brusque, on peut observer que, au voisinage du seuil, l'intensité du courant de perte varie à peu près linéairement avec la différence de potentiel appliquée.

TABLEAU I

Variation du courant de perte avec la tension appliquée dans le cas de la pointe métallique utilisée

Tension en kV	9,25	9,6	10,	10,25	10,5	10,75	11,	11,25	11,6	11,75	
Courant en micro-ampères	0,02	0,09	0,17	0,22	0,26	0,31	0,37	0,41	0,48	0,51	
Tension en kV	11,9	12,2	12,5	12,8	13,2	13,5	13,8	14,2	14,6	15	15,5
Courant en micro-ampères	0,54	0,61	0,69	0,82	0,90	0,99	1,09	1,22	1,32	1,47	1,62

Nous avons tracé ci-dessous la courbe correspondant à ce tableau.



Cependant, l'examen de l'écran de l'oscillographe, but principal de cet essai, nous montre, au voisinage du seuil de l'émission de la pointe fixe, une magnifique succession d'impulsions rapprochées, très régulières, absolument semblables à celles que l'on obtient avec les oscillateurs à relaxations [3] .

Ces pulsations de relaxation apparaissent au moment précis où se produit le début de la décharge par effet couronne; leur fréquence, d'abord de quelques centaines de périodes par seconde, atteint, pour une tension légèrement supérieure au seuil, quelques milliers de périodes par seconde.

Nous reproduisons ci-dessous l'un des oscillogrammes obtenus avec notre pointe métallique et nous remarquons

La similitude complète du phénomène d'impulsions actuel avec celui que nous avons constaté précédemment sur la partie décroissante des relevés correspondant au courant émis par une pointe d'eau vibrante.



Ce phénomène de relaxation qui prend naissance au début de l'émission d'une pointe fixe nous a paru intéressant à étudier de plus près. L'on a remarqué ainsi que, lorsqu'on fait varier la tension appliquée à la pointe, à partir de la valeur correspondante au seuil de l'émission, la fréquence des impulsions observées varie linéairement avec l'intensité du courant de perte et, par conséquent, avec la tension appliquée à la pointe (du fait des observations précédentes)

D'autre part, l'amplitude des oscillations observées sur l'écran diminue au fur et à mesure que l'intensité du courant d'émission augmente. Cette dernière observation, paradoxale à première vue, peut s'expliquer, comme nous le verrons plus loin.

TABLEAU II

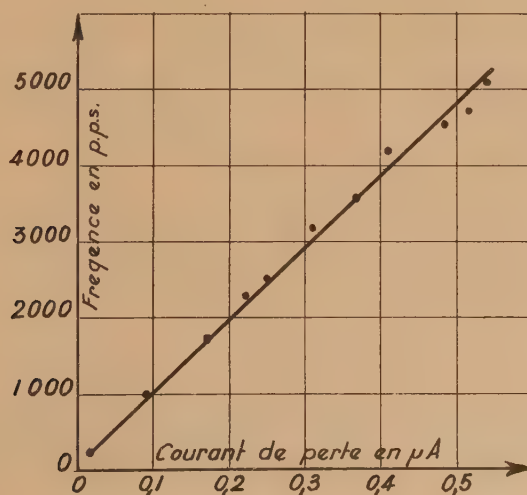
Variation de la fréquence des impulsions de relaxation avec le courant d'émission et la tension appliquée dans le cas de la pointe métallique utilisée

Tension en kV	9,25	9,6	10,	10,25	10,5	10,75	11,	11,25	11,6	11,75	11,9
Fréquence en p.p.s.	250	1000	1650	2250	2500	3200	3600	4200	4500	4700	5100
Courant en micro-ampères	0,02	0,09	0,17	0,22	0,26	0,31	0,37	0,41	0,48	0,51	0,54

Au-dessus de 11,9 kV, le courant d'émission devient continu et les impulsions de relaxation disparaissent.

Ce curieux phénomène peut avoir une application immédiate à la détermination rapide des seuils des émissions au laboratoire. Il suffit alors d'intercaler un oscillographe cathodique dans le circuit et d'examiner l'apparition des premières impulsions sur l'écran fluorescent.

Nous avons représenté ci-dessous la courbe qui correspond au tableau II précédent.



Pour terminer l'étude expérimentale de ce chapitre, il convient de mesurer les courants de perte dus à la présence des gouttes d'eau sur les conducteurs.

Au cours des essais précédents, on a remarqué, et nous y reviendrons dans le chapitre suivant, que, quel que soit le volume initial de la goutte déposée sur le conducteur, le volume devient approximativement constant après la brusque mise en pointe qui élimine au début du phénomène le trop-plein.

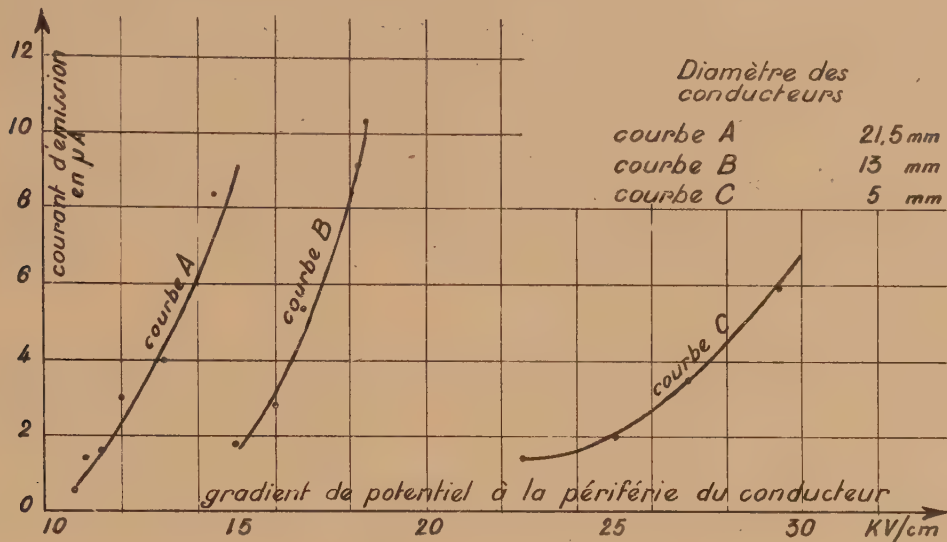
On trouve dans la mesure des courants de pertes pour différentes électrodes les résultats consignés dans le tableau suivant :

TABLEAU III

Variation de l'intensité moyenne du courant de perte dû à la présence d'une goutte d'eau suspendue à un conducteur en fonction du champ électrique à la périphérie de ce dernier.

Diamètre du conducteur 5mm			Diamètre du conducteur 13 mm			Diamètre du conducteur 21,5mm		
Gradient de potentiel kV/cm	courant de perte 10 ⁻⁶ Amp.	Observations sur la vibration	Gradient de potentiel kV/cm	courant de perte 10 ⁻⁶ Amp.	observations sur la vibration	Gradient de potentiel kV/cm	courant de perte 10 ⁻⁶ Amp.	observations sur la vibration
22,6	1,40	début 22,6 kV/cm soit 25,8 kV	15	1,78	début 15 kV/cm soit 35kV			
25	2		15,4	1,86		10,8	0,53	début
27	3,60	fin 27 kV/cm soit 30,8 kV	16	2,79	fin 16 kV/cm soit 37,3 kV	11,1	1,40	10,8kV/cm soit 36,1 kV
29,4	6		16,8	5,44		11,4	1,60	fin
			18,4	10,40		12	3	11kV/cm
			28,2	30		13,1	4	soit
						14,4	8,43	36,8 kV

Nous avons représenté ci-dessous les courbes correspondant à ce tableau :



Nous remarquons sur les courbes que, à courant de perte égal, le champ correspondant à l'émission de la goutte suspendue est supérieur pour un conducteur de faible diamètre. Par contre, à champ égal, le courant d'émission d'une pointe d'eau est inférieur pour un diamètre de faible valeur.

CHAPITRE III

ETUDE DU PHENOMENE D'OSCILLATION

MECANIQUE DES GOUTTES D'EAU PENDANTES.

Après avoir étudié l'émission de courant de perte due à la présence de gouttes d'eau à la périphérie d'un conducteur, phénomène qui a une application industrielle immédiate et intéressante, il est important de jeter un peu de lumière sur les circonstances et les causes qui déterminent le mouvement de vibration auto-entretenu des gouttes d'eau que nous avons signalé au chapitre précédent.

I - MONTAGES ET TECHNIQUES UTILISES

Le montage adopté est le même que celui que nous avons utilisé pour l'étude précédente. Cependant, nous avons été amenés à cinématographier les différentes phases du phénomène étudié.

Après de nombreuses difficultés expérimentales de toutes sortes, que nous passerons sous silence pour ne pas alourdir notre exposé, nous avons stroboscopé le phénomène par éclairs lumineux.

L'appareil de stroboscopie utilisé et représenté schématiquement sur la figure 3 est un appareil de construction SEGUIN, dont nous avons remplacé le tube au néon par un tube à hydrogène, plus lumineux. Les éclairs produits dans ce tube par les décharges du condensateur ont donné une solution pratique et intéressante du problème.

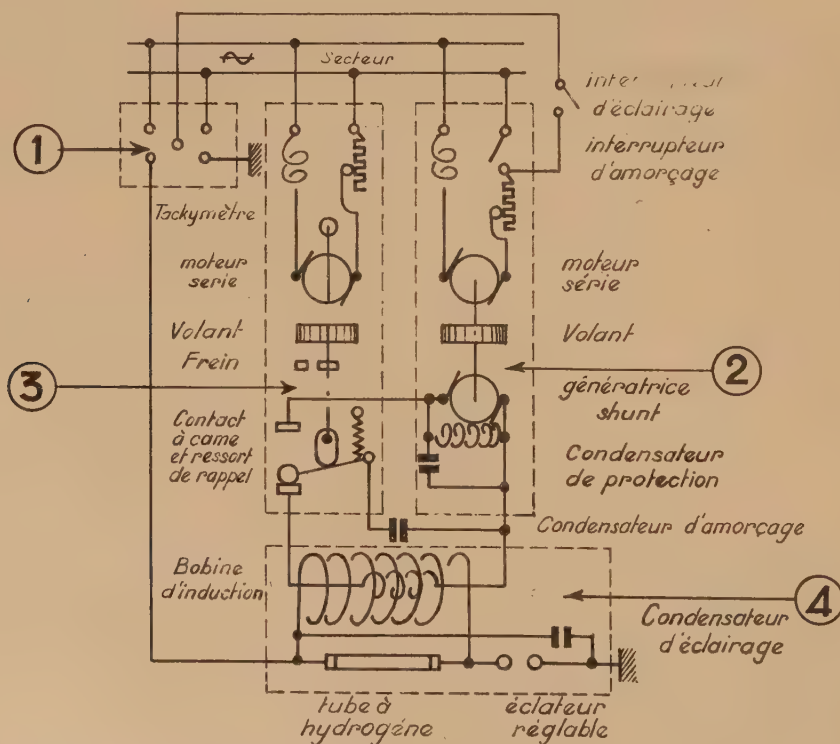


FIGURE 3 - Schéma montrant l'organisation de l'appareil stroboscopique : 1, poste à haute tension continue; 2, générateur d'alimentation; 3, synchroniseur; 4, éclaireur.

Ces décharges suivent le mouvement de la goutte examinée au moyen d'un synchroniseur, dont le contact tournant déclenche un courant très faible, destiné à amorcer la décharge du condensateur d'éclairage sans que le courant de très grande énergie de cette décharge traverse le contact.

Ce dispositif, qui correspond à un véritable asservissement, donne à l'appareil stroboscopique les qualités suivantes :

- 1) une grande stabilité, parce que le contact du synchroniseur, qui détermine les éclairs, n'est traversé que par un courant très faible;
- 2) un éclairage de durée très courte;
- 3) une grande intensité d'éclairage.

Ces trois qualités nous ont permis d'obtenir dans des conditions très satisfaisantes la stroboscopie et la cinématographie ultra-rapide du phénomène étudié.

L'organisation du matériel représenté sur la figure 4 permet :

- a) - l'étude visuelle et l'examen au ralenti de l'ombre de la goutte vibrante, à l'aide d'une lunette de visée mise au point sur un écran constitué par un verre dépoli;
- b) - la prise de vue ultra-rapide, obtenue en déclenchant un train d'éclairs à fréquence très élevée : les images successives données sont enregistrées sur un film panchromatique qui se déroule à grande vitesse.

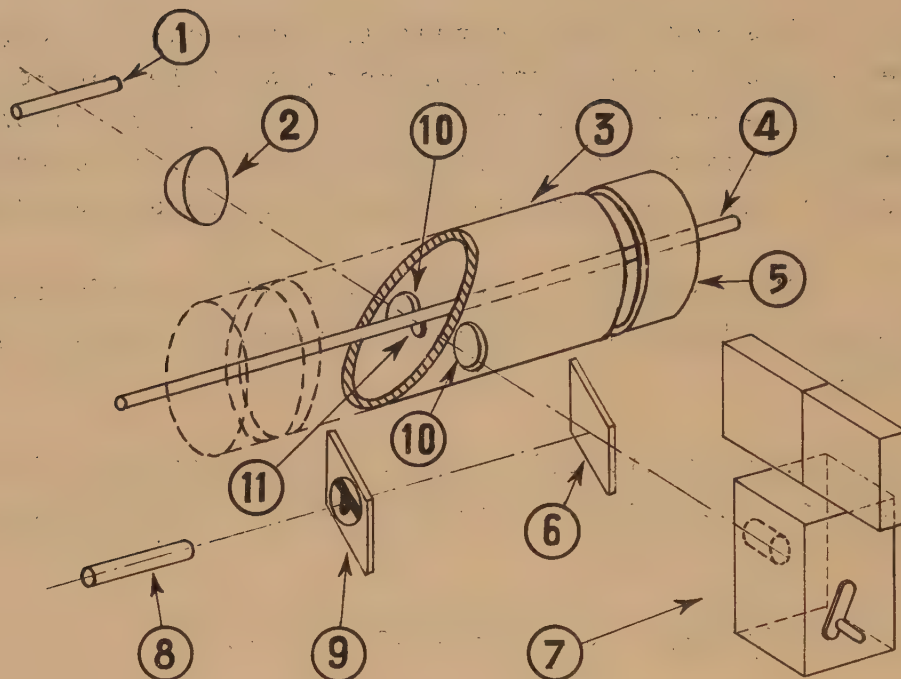


FIGURE 4. — Schéma du dispositif permettant l'étude stroboscopique visuelle et la cinématographie ultra-rapide, par ombre, des vibrations d'une goutte d'eau pendante au conducteur sous tension : 1, éclateur stroboscopique; 2, lentille convergente; 3, électrode de capture; 4, conducteur sous tension; 5, électrode de garde; 6, glace sans tain; 7, appareil cinématographique à prise de vues ultra-rapides; 8, lunette de visée; 9, verre dépoli; 10, fenêtres d'observations; 11, goutte d'eau pendante à étudier.

Les observations stroboscopiques et les prises de vues ont été réalisées à l'intérieur d'une pièce transformée en chambre noire.

Le phénomène à cinématographier doit être le moins possible éclairé par la lumière parasite extérieure; il faut éviter aussi les reflets lumineux sur l'objectif de l'appareil ou sur la glace sans tain; nous avons disposé le conducteur soumis à l'effet couronne, ainsi que l'appareil de prise de vues, à l'intérieur d'une caisse en bois de grandes dimensions visible sur la figure 5, dont les parois internes sont peintes en noir mat.

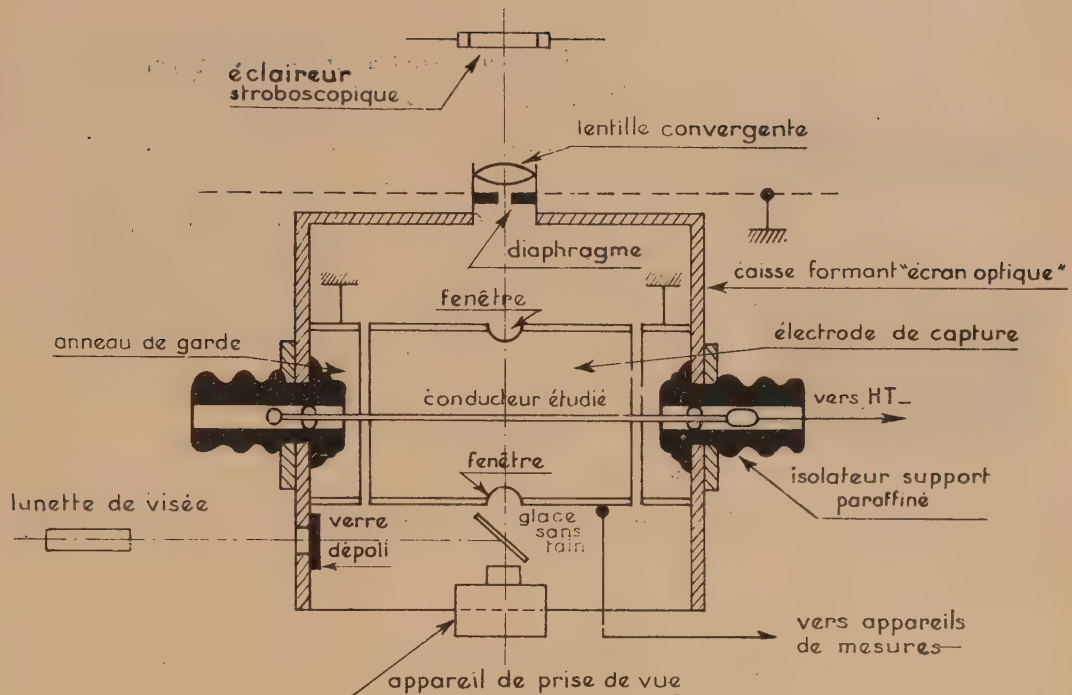


Figure 5.- Disposition particulière des appareils au cours d'une prise de vue cinématographique.

II - RESULTATS EXPERIMENTAUX

Soit une goutte d'eau, de grosseur quelconque, pendante à la partie inférieure d'un conducteur cylindrique qui représente la ligne à étudier.

Si l'on élève assez rapidement la tension appliquée au conducteur, on remarque qu'à un moment donné la goutte se



met brusquement en pointe, sous l'action des tensions électrostatiques développées à la surface de la goutte, et élimine de ce fait une partie de son eau en excédent. La première photographie ci-contre, prise en vue directe ultra-rapide, représente cette époque importante où la longueur de la pointe fugace passe par son maximum; à titre de comparaison, nous donnons au-dessous

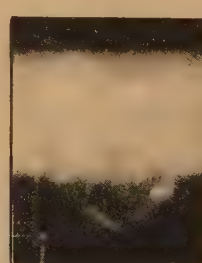
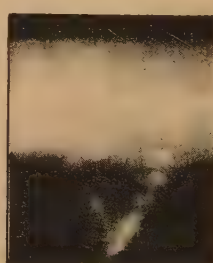
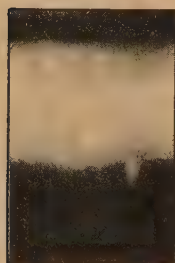
de cette photographie la forme pointue maximum que prend cette goutte après avoir éliminé son eau excédentaire.



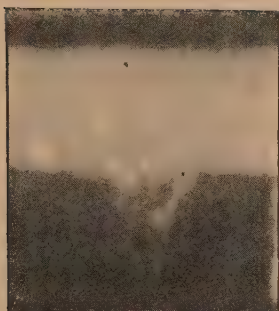
On a constaté que, sur plus de cinquante expériences échelonnées sur une durée d'une année, quelle que soit la quantité d'eau contenue dans les gouttes d'eau initialement déposées sur le conducteur, le volume d'eau qui reste après cette première mise en pointe brusque est approximativement constant pour un conducteur et une mise sous tension donnée.

Après cette élimination d'eau, si l'on continue à augmenter la tension appliquée au conducteur, il arrive un moment où la goutte prend un mouvement de vibrations auto-entretenues comme nous l'avons déjà indiqué :

Les photographies suivantes montrent en vues directes quatre phases du phénomène de vibration de la goutte d'eau :



Ces vues intéressantes permettent de suivre la déformation de la membrane capillaire depuis le moment où elle se trouve en demi-boule et celui où elle présente la forme pointue déjà signalée.

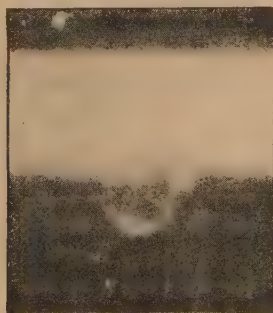


Nous reproduisons également ci-contre une surimpression obtenue par stroboscopie : nous avons réglé la vitesse des éclairs, de manière à avoir, sur une même photographie, les deux formes correspondant aux déformations extrêmes de la goutte d'eau au cours de son mouvement vibratoire.

Le problème est assez complexe à étudier, puisqu'il résulte d'une action simultanée de la tension capillaire du liquide et de la tension électrostatique due au champ électrique. Nous avons été amenés, pour analyser le mécanisme de ce phénomène nouvellement observé, à procéder à une série d'essais systématiques, en ne faisant varier qu'un seul des paramètres à la fois.

A - INFLUENCE DU VOLUME DES GOUTTES PENDANTES

On remarque que le volume des gouttes d'eau, après l'impulsion brusque initiale, est approximativement constant. Si l'on a ramené à zéro la tension appliquée au conducteur, on peut constater que la goutte a une forme arrondie régulière, dont le rayon est très voisin de 2,3 mm pour un conducteur de 5mm de diamètre.



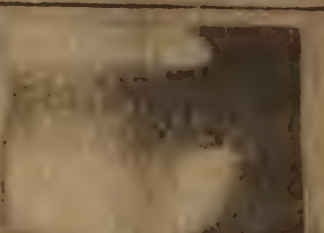
Etant donné une goutte d'eau suspendue au conducteur, et de volume ainsi défini, on observe, en augmentant progressivement la tension, qu'elle prend un mouvement de vibration auto-entretenu.

La fréquence de ces vibrations au début du phénomène est approximativement la même pour les différentes expériences, et voisine de 30 périodes par seconde pour le conducteur de 5 mm de diamètre.

REPRODUCTION D'UNE PRISE DE VUE CINEMATOGRAPHIQUE ULTRA-RAPIDE DE L'OMBRE D'UNE GOUTTE D'EAU VIBRANTE

La goutte suspendue a un conducteur, de 5 mm de diamètre, présente, avant la mise sous tension, une forme arrondie de 2,3mm de rayon. La fréquence de l'oscillation est de 29 périodes par seconde.

Temps millièmes de seconde	Profil de la goutte
0	
3,7	
7,4	
10,1	
14,8	

Temps millièmes de seconde	Profil de la goutte
33,3	
29,6	
25,9	
22,2	
18,5	

Pour nous rendre compte de l'influence du volume de la goutte sur la fréquence d'oscillation, nous avons fait une série d'autres expériences :

Le problème de la vibration des gouttes d'eau sphériques est connu depuis plus d'un siècle et de nombreux physiiciens l'ont étudié dans son ensemble [4 et 5] . On peut, par un rapide calcul, trouver la loi générale de la fréquence propre de la goutte d'eau en utilisant l'analyse dimensionnelle.

En l'absence du champ électrique, le phénomène dépend de la tension capillaire du liquide, de sa densité et de son volume.

La fréquence propre des vibrations est, de ce fait, une formule de la forme :

$$F = \Phi (A, \rho, r)$$

A = tension capillaire,

ρ = densité du liquide,

r = rayon de la goutte non déformée (supposé de forme sphéroïdale)

Nous pouvons développer cette fonction en série sous forme d'un polynôme, chaque terme étant

$$K A^m \rho^n r^p \quad \text{et} \quad f = \sum K A^m \rho^n r^p$$

Les K désignant des facteurs numériques.

Les équations de dimensions des différentes variables sont :

$$f \rightarrow T^{-1} ; A \rightarrow MT^{-2} ; \rho \rightarrow ML^{-3} ; r \rightarrow L$$

La formule précédente s'écrit de ce fait par suite de l'homogénéité nécessaire :

$$T^{-1} = M^m T^{-2m} M^n L^{-3n} P$$

L'identification des exposants donne :

$$M = \frac{1}{2} \quad N = -\frac{1}{2} \quad p = -\frac{3}{2}$$

d'où :

$$f = K \sqrt{\frac{A}{\rho \cdot r^3}}$$

C'est la formule indiquée par Monsieur BOUASSE, dans son traité de capillarité [5], en étudiant analytiquement le problème.

Il nous a donc semblé intéressant de vérifier si la fréquence propre de notre goutte pendante, qui peut être assimilée approximativement au repos à une demi-sphère, varie en fonction de son rayon suivant la loi définie par la formule précédente.

On a monté, pour vérifier cette hypothèse, un tube en métal léger, de 10 mm de diamètre et de 5 cm de longueur, sur l'équipage mobile d'un haut-parleur. La bobine d'excitation de ce dernier est alimentée à l'aide d'un oscilateur basse fréquence étalonné.

Une lunette de visée, avec échelle micrométrique, permet de mesurer le diamètre de la goutte pendante avec une précision du dixième de millimètre.

Par ailleurs, on a trouvé que la fréquence d'une goutte suspendue à un fil cylindrique était approximativement la même, pour un volume d'eau donné, que celle d'une goutte suspendue sous une surface plane.

Pour différentes grosseurs de goutte d'eau, on a trouvé les valeurs de résonance suivantes :

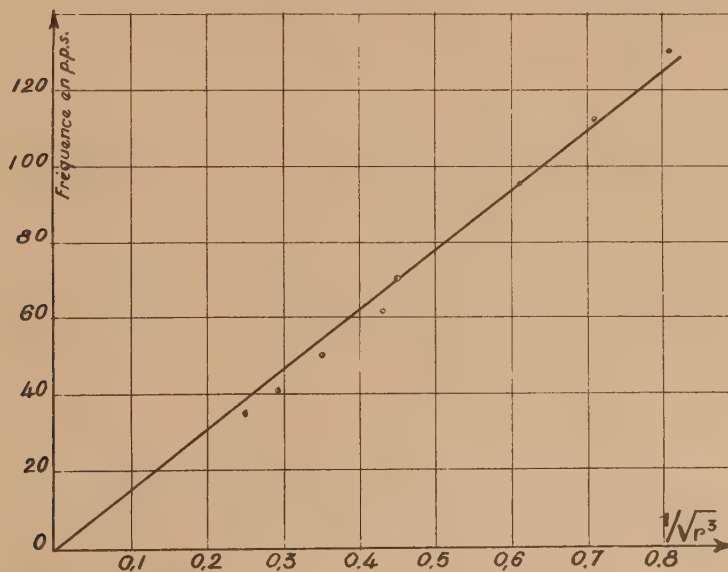
TABLEAU IV

(Conducteur de 10 mm de diamètre, non soumis à un potentiel électrique)

Variation avec le volume I de la fréquence propre d'une goutte d'eau suspendue.

Rayon r de la goutte pendante avant déforma- tion en mm	I $\sqrt{r^3}$	Fréquence en P.P.S.	
		Goutte au-dessous du conducteur	Goutte au-dessus du conducteur
1,15	0,81	130	
1,25	0,71	112	128
1,7	0,45	70	87
1,75	0,43	62	70
2,05	0,35	50	60
2,25	0,29	41	
2,55	0,25	35	

Nous avons tracé ci-dessous la courbe correspondant à la goutte située au-dessous du conducteur :



Le graphique précédent montre que la variation de la fréquence propre d'une goutte suspendue au conducteur suit approximativement en fonction du rayon une loi en $1/\sqrt{r^3}$. A remarquer également que la fréquence, pour une goutte donnée, est différente lorsqu'elle se trouve située au-dessous ou au-dessus du conducteur, les amplitudes du mouvement étant nettement inférieures dans le second cas. Cela prouve une nette influence de la pesanteur sur le phénomène, puisque, entre les deux positions, il y a une action de $2g$ comme différence.

B - INFLUENCE DU CHAMP ELECTROSTATIQUE

Comme les gouttes dans la pratique pendent sous des conducteurs, sous tension, nous devons nous rendre compte de l'influence de la tension sur la période propre des gouttes pendantes.

A cet effet, nous avons installé en regard du conducteur précédent, réuni à l'équipage mobile du haut-parleur, une plaque métallique portée à une tension variable.

Nous avons cherché pour différentes valeurs de la tension la valeur de la fréquence propre de vibration; les résultats trouvés sont consignés dans le tableau suivant :

TABLEAU V

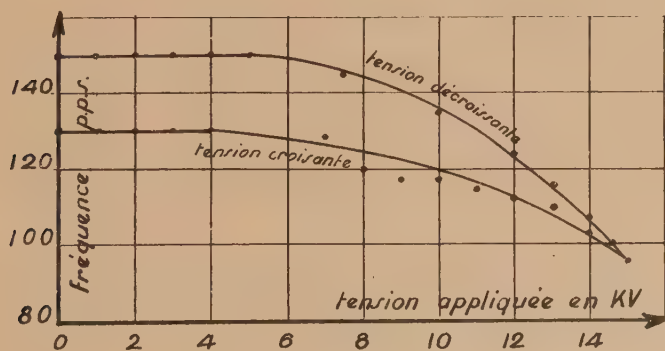
Influence de la tension appliquée sur la période propre du mouvement oscillatoire d'une goutte d'eau suspendue à un conducteur de 10 mm de diamètre (la plaque sous tension est située à une distance de 5cm de la périphérie du conducteur)

ESSAIS A TENSION CROISSANTE

Tensions appliquées à la plaque en kV (tensions croissantes)	0	1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	13	14	14,5	15
Fréquences propres en p.p.s.	130	130	130	130	130	130	128	122	118	118	114	112	110	102	100	95

ESSAIS A TENSION DECROISSANTE

Tensions appliquées à la plaque en kV (tensions décroissantes)	15	14	13	12	10	7,5	5	4	3	2	1	0
Fréquences propres en p.p.s.	95	106	115	123	135	145	150	150	150	150	150	150



On remarque plusieurs résultats intéressants en observant ce tableau.

1° Le champ a une influence très nette sur la période de vibration; il a pour conséquence de ralentir le mouvement.

2° Il y a un gain de fréquence entre le début et la fin de l'expérience, ce qui provient évidemment d'une diminution du volume de la goutte d'eau pendante. Le diamètre de la goutte passe, en effet, de 2,3 mm au début de l'essai à 1 mm. environ à la fin.

Il est facile de contrôler par une autre expérience l'influence effective du champ sur la fréquence propre d'une goutte.

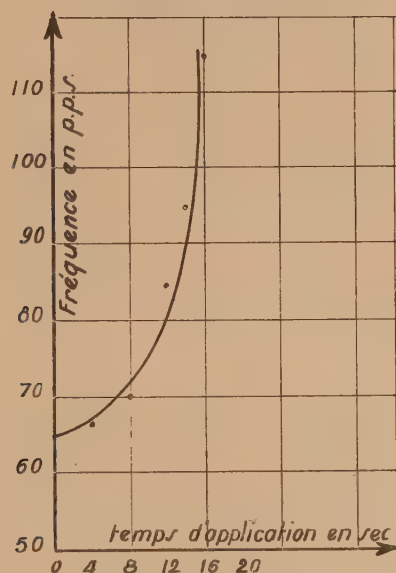
Au lieu d'installer la plaque sous tension en-dessous du conducteur, on l'a installée au-dessus. Dans un premier essai, pour une goutte pendante sous le conducteur, nous mesurons sans action du champ électrostatique la fréquence de vibration correspondant à une goutte de 2mm,8 de diamètre et nous trouvons 50 p.p.s. En faisant tourner le conducteur pour amener la goutte à la partie supérieure, nous mesurons la nouvelle valeur de la fréquence de vibration, nous trouvons 65 p.p.s.; à ce moment, nous avons remarqué qu'en appliquant à la plaque, distante de 5 cm de la périphérie du conducteur, une tension de 12,3 kV on ramène la fréquence de 65 p.p.s. à la valeur de 50 p.p.s.; de ce fait l'action des 2 g se trouve compensée.

C - INFLUENCE DE LA DUREE D'APPLICATION DE LA TENSION -

Ainsi que nous l'avons remarqué au cours de nos précédentes expériences, il y a une diminution de volume de la goutte pendante avec le temps lors de l'application de la

tension au conducteur. Pour confirmer cet essai, nous avons observé dans une autre série d'expériences que, lorsqu'une goutte d'eau vibre, il se produit au bout d'un certain temps un arrêt du mouvement vibratoire et qu'il faut augmenter la tension appliquée pour déclencher à nouveau le mouvement et ainsi de suite jusqu'à complète disparition de la goutte d'eau pendante. De même, lorsque la tension appliquée a une valeur élevée et que, de ce fait, la goutte d'eau prend la forme d'une pointe fixe, celle-ci disparaît entièrement au bout d'un certain temps.

A cet effet, nous avons, pour une tension négative constante de 10 kV, examiné la loi de variation de la fréquence en fonction du temps; la courbe trouvée pour une goutte initiale de 3 mm 4 de diamètre est représentée ci-dessous.



Cet assèchement que l'on remarque au laboratoire a été déjà observé par l'auteur sur les lignes aériennes de transport d'énergie à très haute tension. En effet, lorsque l'on met une ligne sous tension, celle-ci présentant une série

de gouttes pendantes après une pluie ou une rosée matinale, on constate que ces gouttes d'eau disparaissent rapidement.

Examinant de plus près cette disparition des gouttes, on trouve qu'elle est due à deux causes différentes et simultanées :

La première cause est une évaporation activée de la goutte d'eau sous l'action du "vent électrique", qui balaie la surface de la goutte.

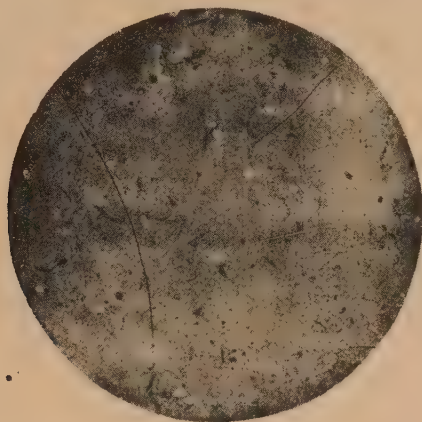
Pour vérifier cette évaporation, on procède de la manière suivante :

Dans deux coupelles en cuivre identiques, on dépose 20 grammes d'eau. La surface libre du liquide, et par conséquent la surface d'évaporation, est de 45 cm². L'une des deux coupelles est portée à un potentiel continu négatif de 20 kV, l'autre joue le rôle de témoin; elle est dans la même pièce, mais n'est soumise à aucune action électrique. On observe pendant une durée de quatre heures une évaporation constante de trente-cinq centigrammes d'eau toutes les trente minutes dans la coupelle sous tension électrique, alors que, pendant le temps de l'expérience, le poids de l'eau contenue dans la coupelle témoin varie de moins de un milligramme.

La seconde cause est l'élimination par la pointe, de très fines gouttelettes d'eau. Pour vérifier cette projection de particules liquides, on applique la méthode suivante due à Monsieur DEMON [6] .

On réalise de grandes lames dichroïques, constituées par des cristaux de bleu de méthylène orientés sur une lame de mica. On dispose cette lame au voisinage de la pointe d'eau, afin de recueillir les gouttes projetées. On exa-

mine ensuite la lame à travers un microscope, en éclairant le champ observé avec de la lumière polarisée, en la disposant sur une lame d'héraphathite (polaroïde), éclairée en lumière blanche par exemple; les impacts de gouttelettes apparaissent comme des taches rondes. Pour un azimut convenable de la vibration, les taches apparaissent incolores sur fond bleu violet foncé (en tournant la lame de 90° , la couleur violette du fond est complètement éteinte).



Nous donnons une reproduction microphotographique d'une telle lame et on pourra y remarquer les impacts dus à la projection de fines gouttelettes par la pointe d'eau.

CHAPITRE IV

DISCUSSION DES RESULTATS OBTENUS

I - VIBRATION DES GOUTTES PENDANTES

Essayons tout d'abord d'expliquer le mécanisme de cette vibration des gouttes d'eau pendantes sous un conducteur porté à une haute tension continue.

Dans l'étude de la mécanique des fluides, le phéno-

mène de vibration des gouttes d'eau qui se produisent au moment du sectionnement d'une veine liquide, est bien connu et nous savons que, dans ce cas [5], une goutte d'eau prend d'abord une forme ellipsoïdale allongée; cette forme n'étant pas stable, l'ellipsoïde se raccourcit ensuite en tendant vers la forme sphéroïdale. Quand cette dernière forme est atteinte, nous n'avons pas un état d'équilibre : en vertu des vitesses acquises, la forme sphérique est dépassée et l'ellipsoïde allongé précédent se transforme en ellipsoïde aplati. Et ainsi de suite. La goutte exécute donc une série de vibrations, la faisant passer de la forme allongée à la forme aplatie, et inversement; le mouvement continue jusqu'à ce que toute l'énergie en excès contenue dans la goutte, au début de sa formation, soit transformée en chaleur par suite du frottement visqueux.

Nous savons que, dans ce cas, la période de vibration dépend de la dimension de la goutte, ainsi que de la tension capillaire du liquide, comme nous l'avons rappelé précédemment.

Dans notre cas, le problème se présente sous une forme différente et en apparence plus complexe du fait de la présence du champ électrique. Pour les valeurs assez grandes de la tension appliquée au conducteur, il y a effets contraires dus à la tension capillaire, qui tend à rendre minimum l'aire de la goutte et la tension électrostatique qui agit en sens inverse.

Nous avons constaté au cours de notre étude 3 stades importants dans le phénomène observé suivant la valeur de la tension appliquée au conducteur.

1) Faible tension appliquée - La goutte pendante reste de forme arrondie, l'action des forces capillaires étant pondérante.

2) Forte tension appliquée - La goutte pendante prend la forme d'une pointe fixe par suite de l'action des tensions électrostatiques élevées.

3) Pour un certain domaine intermédiaire de tensions - La goutte pendante est animée d'un mouvement oscillatoire auto-entretenu qui peut s'expliquer de la manière suivante :

Dès que le champ électrique atteint une valeur convenable, l'action des forces électrostatiques à la surface de la goutte pendante devient supérieure à celle des forces capillaires et la goutte tend à se mettre en "pointe"; comme dans le cas des gouttes sphéroïdales rappelé précédemment, en vertu des vitesses acquises, l'état d'équilibre est dépassé et la goutte atteint une forme pointue prononcée. Le champ à l'extrémité de la pointe prend une valeur permettant à l'ionisation par choc de s'amorcer et il y a une émission par effet couronne de la goutte pendante. Mais dès que l'émission est commencée le champ immédiatement au voisinage de l'extrémité de la pointe décroît par suite de la présence ambiante d'une charge d'espace de même signe. Le champ diminuant, les forces électrostatiques à l'extrémité de la goutte diminuent et, comme la forme précédente n'est pas stable, la pointe se raccourcit en tendant vers la forme arrondie. A ce moment nous sommes revenu aux conditions initiales et le phénomène recommence son cycle.

Ainsi le choc produit par la variation brusque du champ à l'extrémité de la pointe à chaque passage à l'élongation maximum de la goutte permet l'entretien du mouvement.

Nous avons exécuté, par ailleurs, des essais en modifiant la nature des gouttes pendantes afin de se rendre compte de l'influence du liquide utilisé sur le phénomène.

L'eau distillée, l'eau de ville, l'eau de pluie et l'acide acétique ont été successivement employés. Pour chacun de ces liquides nous avons constaté que la fréquence des oscillations mécaniques varie dans le même sens que les tensions capillaires correspondantes.

Ainsi, nous avons observé, par exemple, pour de l'eau de ville et de l'acide acétique, présentant respectivement une élévation dans un tube capillaire de 52 et 94 mm, une fréquence de :

Eau de ville : 23 p.p.s.

Acide acétique : 33 p.p.s.

Dans les deux expériences la goutte a un rayon d'environ 2,6 mm et est suspendue à un conducteur de 5 mm de diamètre.

II - PHENOMENE DE RELAXATION DANS L'EMISSION DES POINTES FIXES

L'explication des phénomènes de relaxation que l'on observe sur les relevés oscillographiques, exécutés au

seuil de l'effet couronne, peut se déduire des conditions électriques au voisinage immédiat de la pointe ionisante.

Comme nous l'avons rappelé au début de l'exposé de notre travail, la décharge par effet couronne est due à un phénomène d'ionisation par choc.

Quand l'ionisation commence, des charges de même signe que la pointe sont chassées dans l'espace. Cette couche de charges élève le gradient en tous les points situés en dehors de la couche et réduit le gradient à l'extrémité de la pointe où l'ionisation prend naissance; la charge d'espace sert de bouclier contre l'effet de pointe et arrête l'ionisation, si bien que le gradient à l'extrémité de la pointe ne dépasse plus la valeur critique à laquelle l'effet couronne se déclenche.

Par suite, le courant recueilli par l'électrode de capture diminue et s'annule même complètement.

A ce moment, le champ au voisinage de la pointe recommence à augmenter et atteint rapidement sa valeur critique. On est revenu au point de départ et le cycle peut recommencer.

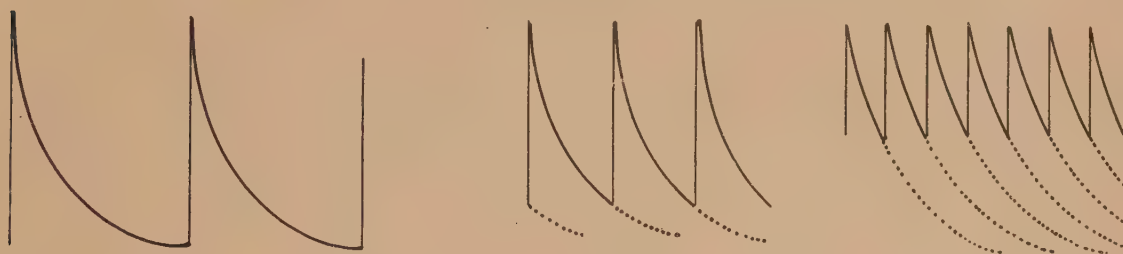
Ainsi peut s'expliquer le phénomène de relaxation que l'on a observé.

Nous avons remarqué précédemment que la fréquence des oscillations de relaxation augmente avec la tension appliquée. Cela peut s'expliquer simplement de la manière suivante :

Si la fréquence augmente avec le champ, cela provient de ce que l'ionisation par choc peut alors commencer

plus tôt parce que le nuage d'ions antérieurement formé s'éloigne plus vite.

Dessignons ci-dessous quelques impulsions :



Le premier dessin de gauche représente les pulsations au début de l'effet couronne. Un temps très long est nécessaire pour que le champ reprenne sa valeur critique. Si on élève la tension appliquée à la pointe, le champ correspondant, qui tendra à être étouffé par le bouclier de charges d'espace, ne peut pas descendre au-dessous d'une certaine valeur et réagit; il possède vis-à-vis de l'étouffement une valeur encore suffisante pour assurer une accélération convenable aux ions. De ce fait, une nouvelle émission débute pour une valeur non nulle du courant de perte, comme il est représenté sur la figure du milieu et de droite ci-dessus.

Nous pouvons dire que le phénomène de relaxation est surtout lié au débit des ions. Plus celui-ci est grand, plus la fréquence sera élevée, ceci jusqu'au moment où le débit est alors suffisant pour devenir permanent et assurer ainsi la naissance d'un courant de perte continu; il semble bien qu'il y ait proportionnalité au début du phénomène entre ce débit et la fréquence.

Les croquis précédents permettent d'expliquer la diminution de l'amplitude des oscillations lorsqu'on augmente le courant de perte. En réalité, nous voyons que cette amplitude diminue apparemment parce qu'on ne peut observer

sur l'écran de l'oscillographe cathodique les parties pointillées de nos croquis.

III - MISE EN EQUATION DES RESULTATS -

En ce qui concerne le phénomène de vibration de la goutte pendante, il est très difficile de procéder à un calcul de la fréquence à cause des nombreux paramètres dont dépend le mouvement. Même un calcul très approximatif est inextricable, les forces en présence étant des forces de volumes et des forces de surfaces et la densité électrostatiques superficielle ne pouvant être déterminée avec précision.

Seule, reste possible la mise en équation des résultats relatifs au phénomène de relaxation découvert dans l'étude de la pointe fixe.

Nous avons employé la méthode des sommes et différences pour la mise en équation des résultats.

TABLEAU VI

Relation entre le courant de perte et la tension appliquée
(début de l'effet couronne)
pour la pointe de phonographe utilisée

Tension en kV	Intensité moyenne en 10 ⁻⁶ ampères	Tension en kV	Intensité moyenne en 10 ⁻⁶ ampères
9,25	0,02	10,75	0,31
9,6	0,09	11	0,37
10	0,17	11,25	0,41
10,25	0,22	11,60	0,48
10,5	0,26	11,75	0,51
Σ 49,60	Σ 0,76	Σ 56,35	Σ 2,08

$$\Delta \Sigma U = 6,75 \quad , \quad \Delta \Sigma i = 1,32$$

$$\Sigma \Sigma U = 105,95 \quad \Sigma \Sigma i = 2,84$$

$$U = A + Bi$$

$$B = \frac{6,75}{1,32} = 5,1$$

$$A = \frac{105,95 - (5,1 \times 2,84)}{1,0} = 9,1$$

Par conséquent :

$$U = 9,1 + 5,1 i$$

U est exprimé en kV si i est en micro-ampères.

CHAPITRE V

ANALYSE PRATIQUE ET APPLICATIONS EVENTUELLES DES RESULTATS D'ESSAIS

Nous avons signalé, au cours de notre exposé, que, lors d'un brouillard, d'une rosée ou d'une pluie, les lignes électriques se recouvrent de gouttes d'eau, qui donnent lieu à des pertes par "effet de pointe". Ainsi, les conditions météorologiques laissant des traces sur les câbles électriques, il semble que notre travail peut apporter une contribution intéressante à l'étude des pertes d'énergie correspondant à ces pointes d'eau fugaces.

Cette contribution trouve surtout son originalité dans la tentative que nous avons faite pour expliquer le mécanisme présidant à la naissance prématurée de l'effet couronne dans le domaine bien défini des pointes d'eau.

A) La première application de notre travail est évidemment industrielle - Cette étude doit permettre de calculer les pertes supplémentaires qui apparaissent sur les conducteurs à haute tension par suite de la présence passagère de gouttes d'eau. Cela dans le cas d'une transmission à courant continu

Nous avons constaté qu'un conducteur de 13 mm, par exemple, qui travaille avec un gradient de 28,2 kV/cm, et par conséquent ne donnant lieu à aucune perte par effet couronne en temps normal, présente dès l'apparition d'une pointe d'eau un courant de perte évalué approximativement à 30 micro-ampères.

Cette perte paraît d'abord négligeable, mais elle peut prendre de l'importance en raison du grand nombre des gouttes qui interviennent. Dans un poste d'interconnexion d'énergie électrique de la région parisienne, nous avons procédé à cet effet à quelques relevés statistiques sur le nombre de gouttes d'eau pendantes qui peuvent apparaître sur des conducteurs d'une vingtaine de mètres de longueur et constitués par trois câbles en aluminium acier de 5,4 mm, 12,6 mm et 22,3 mm de diamètre. Après différentes chutes de pluie, de rosées matinales et enfin lors de la fonte d'une forte chute de neige, nous avons trouvé une moyenne de gouttes pendantes comprise entre :

8 à 10	gouttes	au	mètre	linéaire	pour	5mm4
13 à 16	"	"	"	"	"	12mm6
18 à 22	"	"	"	"	"	22mm3

Si nous calculons les pertes correspondant à ces relevés statistiques, nous trouvons une valeur élevée, en ce qui concerne simplement la perte due aux gouttes pendantes, comme nous allons le montrer.

Soit, par exemple, à exécuter une ligne aérienne de transport, d'énergie électrique à courant continu, capable de transiter une puissance de 30 mégawatts à une distance de 100 kilomètres et cela sous une tension au départ de

120 kilovolts.

Les conditions d'échauffement imposent, pour la réalisation de cette liaison, l'utilisation d'un conducteur en cuivre de 100 m² de section minimum.

Portons notre choix sur un câble nu en cuivre dur (bronze type A), présentant comme caractéristiques une section de 100,88 mm² (19 fils de 26/10), un diamètre extérieur de 13mm et une résistance kilométrique à 20°C de 0,1776 ohm. Le rendement de la ligne ainsi équipée est de 93%, ce qui correspond à une perte de puissance de 2250 kilowatts (1), pour la ligne totale.

Le gradient de potentiel à la périphérie des conducteurs calculé pour une disposition en nappe avec une distance entre axes de 5 mètres, donne une valeur moyenne voisine de 15,9 kV/cm.

Ainsi, en temps normal, cette ligne, qui ne présente aucune perte d'énergie par effet couronne, sera d'une conception apparemment satisfaisante. Cependant, à la suite de notre étude (TABLEAU III page 20), il nous est permis d'affirmer qu'au moment d'une chute de pluie, il apparaîtra sur la ligne une perte supplémentaire, due à l'effet de pointe, atteignant une valeur d'un mégawatt pour l'ensemble de la transmission, abaissant, de ce fait, le rendement de la transmission de 3,5%.

Pour éliminer cette perte supplémentaire, il faudra adopter un diamètre minimum de 21,5mm [3]. Ce choix diminuera le gradient de potentiel moyen à 10,5 kV/cm, valeur pour laquelle l'émission des gouttelettes d'eau pendantes n'a plus lieu.

Naturellement, une étude économique décidera en définitive de la section qu'il y a lieu d'adopter. Toutefois, il est très possible que la capitalisation supplémentaire due à l'accroissement de la section du conducteur soit rentable

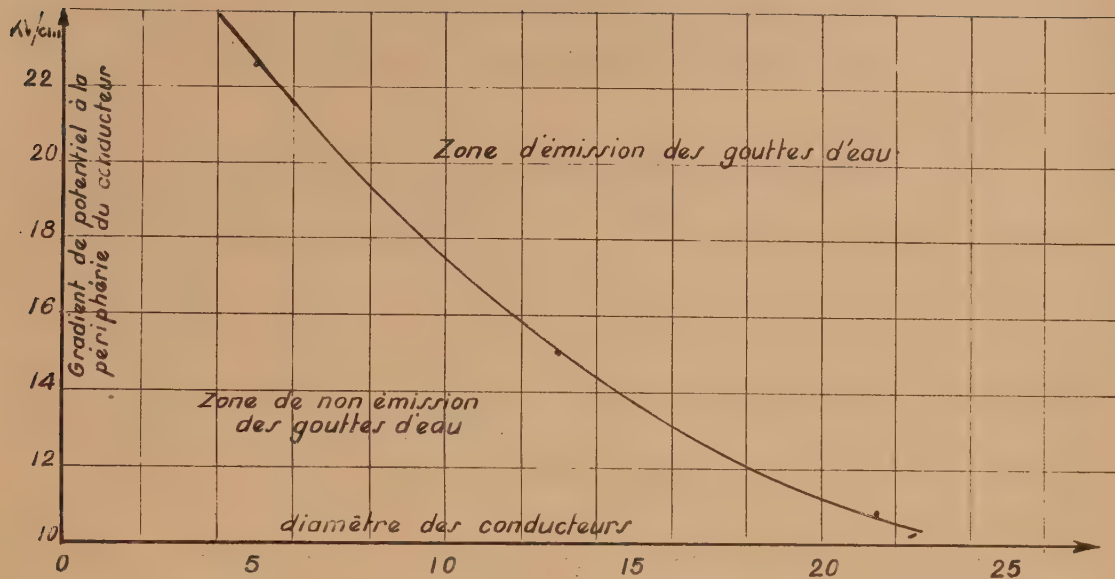
(1) Cette perte correspond essentiellement à l'effet Joule, l'isolement de la ligne étant supposé parfait.

du fait qu'elle détermine par ailleurs une diminution des pertes par effet Joule en régime normal. Dans notre cas, le choix du diamètre de 21,5mm permettra d'accroître le rendement du transit de 4,5% par temps sec et de 8% par temps de pluie. A noter, par ailleurs, que la ligne ainsi construite sera capable de transiter une puissance maximum de 66 mégawatts sans donner lieu à un échauffement exagéré...

Ainsi, de ces quelques considérations pratiques, il se dégage que, dans le cas du transport à courant continu, les caractéristiques des lignes aériennes doivent être déterminées, non pas en recherchant un gradient de potentiel de travail inférieur, de quelques kilovolts par centimètre, à la valeur critique de 31 kV/cm, mais bien en adoptant une valeur légèrement inférieure au champ pour lequel les gouttes d'eau pendantes commencent à émettre, c'est-à-dire à vibrer. Plus le conducteur choisi sera de grand diamètre, plus le champ auquel il faudra le faire travailler devra être faible (2).

Un essai en laboratoire fixera pour chaque câble la valeur qu'il y a lieu d'adopter et cela sans appareils de mesures compliqués, puisqu'il s'agira de rechercher simplement la valeur pour laquelle une goutte d'eau pendante entre en vibration auto-entretenu. Cependant, on peut dire, d'après nos essais, que, pour les câbles d'environ 5mm, 13mm et 21,5mm de diamètre, les valeurs respectives du champ à adopter dans un avant-projet sont voisins de 21 kV/cm, 14 kV/cm et 10 kV/cm.

(2) Cette perte correspond essentiellement à l'effet Joule, l'isolement de la ligne étant supposé parfait.



B) La seconde application de notre travail sera une application de laboratoire, nos observations peuvent contribuer à déterminer le seuil correspondant au début de l'émission. Nous avons constaté, en effet, au cours de l'étude des pointes fixes, que l'émission de courant débute par une série d'impulsions très régulièrement espacées. Ainsi, avec un amplificateur approprié, on pourra déterminer d'une façon simple et précise, le moment où l'on devra lire, sur l'appareil de mesure de tension, la valeur du seuil, en examinant sur l'écran d'un oscillographe cathodique la première apparition des impulsions de relaxation.

Cette méthode peut être utilisée tant en tension positive qu'en tension négative. Les essais que nous avons effectués précédemment en tension négative ont été confirmés en tension positive pour la pointe fixe. Nous avons défini dans les limites d'amplifications permises par notre montage.

Signe de la tension appliquée	Tension appliquée en kV correspondant	
	au début des impulsions	à la fin des impulsions
négative	9	11,3
positive	10,3	14

Nous avons également remarqué que les pulsations obtenues sont plus régulières en tension positive qu'en tension négative.

Nos expériences ayant été exécutées à l'aide d'une pointe, on peut se demander si notre méthode est valable pour les conducteurs. Dans ce but, nous avons répété l'expérience avec notre conducteur de 5mm de diamètre. Nous avons constaté alors un ensemble d'impulsions confuses n'ayant rien de régulier, mais, néanmoins, ces pulsations existent. Dans ce cas, tout se passe comme si le conducteur présentait une multitude de pointes fines émettant d'une manière discontinue. Afin de confirmer cette hypothèse, nous avons disposé sur le conducteur un petit paquet de pointes fixes très voisines, constitué par une petite brosse métallique et nous avons observé le même phénomène d'impulsions confuses. Par ailleurs, si on observe la brosse en chambre noire, on remarque visuellement une instabilité des émissions, les pointes semblant scintiller les unes après les autres, comme si la décharge "sautait" de pointe en pointe,

On peut expliquer, d'après la théorie classique de TOWNSEND [7], le fait que la décharge se produit sur une pointe, puis sur une autre, puis de nouveau sur la première. En raison du bombardement des ions positifs sur l'extrémité de la pointe, la surface se dénude et cesse d'être recouverte par la pellicule gazeuse conductrice. Il en résulte que le coefficient de probabilités γ de TOWNSEND, indiquant le nombre d'électrons libérés par le choc des ions positifs sur la pointe, diminue et que la décharge se déplace vers un point où γ est plus grand et où, d'autre part, l'intensité du champ a une valeur appropriée.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) M. PAUTHENIER et P. MALLARD - Contribution à l'étude du champ électrique dans l'air ionisé à la pression atmosphérique; comptes-rendus des séances de l'Académie des Sciences, 21 Octobre 1929, t CLXXXIX, pages 635-637.
- (2) P. AILLERET - Construction des lignes aériennes - Société Française des Electriciens (cours professé à l'Ecole Supérieure d'Electricité).
- (3) M. PAUTHENIER, L. DEMON et G. DUHAUT - Les pertes de puissance dans les lignes à haute tension continue par effet de gouttes d'eau pendantes; comptes-rendus des Séances de l'Académie des Sciences, 17 juin 1946.
Tome CCXXII, page 1431-1432. Reproduit dans le "Génie Civil" du 1er Août 1946, Tome CXXIII, n° 15, page 207, et dans la "Revue Générale" de l'Electricité" Tome LV, N° 11, de Novembre 1946 page 456.
- (4) H. BOUASSE - Jets, tubes et canaux - Librairie Delagrave, éditeur (1923)
- (5) L. DEMON - Propriétés optiques des cristaux de bleu de méthylène. Thèse présentée à l'Université de Paris le 12 Février 1946, pour l'obtention du titre d'ingénieur docteur.
- (7) J.S. TOWNSEND - The theory of ionisation of gases by collision. London, 1910.

J.S. TOWNSEND - A theory of the glow discharge from wires. The Electrician, June 1913.

=====

TABLE DES MATIERES

	Pages
EXPOSE DU PROBLEME	1
I - GENERALITE SUR LES PERTES DE PUISSANCE PAR EFFET COURONNE (BASES EXPERIMENTALES ADOPTÉES)	5
II - INFLUENCE DES GOUTTES D'EAU PENDANTES	8
CHAPITRE I - Montage et observations préliminaires ...	9
CHAPITRE II- Etude de l'émission de courant des gouttes d'eau pendantes	10
1) Montage et technique utilisée :	10
A - Source à haute tension	12
B - Chambre expérimentale	12
C - Dispositif de mesure et d'investigation	13
2) Mise au point du matériel expérimental ..	14
3) Résultats expérimentaux	14
<i>Tableau I</i> - Variation du courant de perte avec la tension appliquée dans le cas d'une pointe métallique	16
<i>Tableau II</i> - Variation de la fréquence des impulsions de relaxation avec le courant d'émission et la tension appliquée dans le cas d'une pointe métallique	19
<i>Tableau III</i> -Variation de l'intensité du courant de perte dû à la présence d'une goutte d'eau suspendue à un conducteur en fonction du champ électrique à la périphé- rie de ce dernier	20
CHAPITRE III- Etude du Phénomène d'Oscillation mécanique des gouttes d'eau pendantes	
1) Montage et technique utilisée	22

2) Résultats expérimentaux	25
A :- Influence du volume des gouttes d'eau pendantes	27
<i>Tableau IV</i> : Variation de la fréquence propre d'une goutte d'eau suspendue avec son volume	31
B :- Influence du champ électrostatique	32
<i>Tableau V</i> : Influence de la tension appliquée sur la période propre du mouvement oscillatoire d'une goutte d'eau suspendue à un conducteur	33
C - Influence de la durée d'application de la tension	34
CHAPITRE IV - Discussion des résultats obtenus	37
1) Vibration des gouttes pendantes	37
2) Phénomène de relaxation dans l'émission des pointes fixes	39
3) Mise en équation des résultats	42
CHAPITRE V - Analyse pratique et applications éventuelles des résultats d'essais	43
A - Application industrielle	44
B - Application de Laboratoire	47
BIBLIOGRAPHIE	49

DEUXIEME THESE

PROPOSITIONS DONNEES PAR LA FACULTE

Influence des arcs de puissance sur le réenclenchement ultra-rapide des lignes aériennes de transport d'énergie électrique.

Vu et approuvé :

Paris, le 12 Décembre 1947

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

J. CABANNES

Vu

et Permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie
de Paris,

G. ROUSSY

